

掃流土砂による付着藻類の剝離動態に関する検討

濱 上 邦 彦 吉 岡 秀 和
伊 藤 駿 吾 土 谷 幹
辻 村 元 男 吉 岡 有 美
八重樫 優 太

目 次

- I. 緒言
- II. 実験概要
 - 1. 実験装置
 - 2. 実験条件
 - 3. 評価方法
- III. 実験結果
 - 1. 付着藻類の存在体積の時間変化
 - 2. 土砂粒径 d と剝離特性値 p の関係
 - 3. 単位幅流砂量 q_B と剝離特性値 p の関係
 - 4. 仕事量 W_x と剝離特性値 p の関係
- IV. まとめ

Abstract

A hydraulic experiment was conducted for quantitative evaluation of the exfoliation dynamics of algae caused by sediment transport. As a result of

濱上：岩手大学農学部 准教授	}
吉岡秀和：島根大学学術研究院環境システム科学系 助教	
伊藤：復建エンジニアリング 技師	
土谷：岩手大学大学院総合科学研究科 修士2年	
辻村：同志社大学商学研究科 教授	
吉岡有美：島根大学学術研究院環境システム科学系 助教	}
八重樫：住友化学 研究員	

investigating the relationship between the sediment particle diameter d and the unit width sediment discharge q_B with the exfoliation characteristic value p , it was shown that each parameter influences the value of p and that there is a range showing the correlation. It was also shown that the quantity of algae exfoliation can be expected by the amount of work W_x calculated with hydraulic conditions, sediment particle diameter d , and the unit width sediment discharge q_B as parameters. Further studies are needed because there are many problems in application in the field, such as examination of the resistance coefficient due to the shape of the bed, and changes in the exfoliation characteristics due to the growth stage of algae.

I. 緒言

河川管理における重要な課題として堆砂や付着藻類の大量繁茂への対応がある。堆砂に関しては、頭首工等におけるゲートの閉塞問題の他、河道・放水路等での堆砂による流下能力の低下などが起こり、治水・利水の観点から問題となっている。その対策として浚渫による土砂除去が行われているが、浚渫後の堆砂の用途についてしばしば議論がなされている。一方、付着藻類の大量繁茂に関しては、河床を構成する礫や砂利の表面に付着して生長する藻類が過剰繁茂することにより水生生物の生育に影響を及ぼす問題である。糸状藻類であるカワシオグサ *Cladophora glomerata* に関してはダムの下流域等の水や土砂の流れが制限された水域で繁茂が発生しやすい傾向にあり、西日本を中心に、全国各地でその大量繁茂が課題となっている。付着藻類は水生生物の生息域を減少させるほか、河川景観の悪化や他の藻類の発育阻害などが様々な問題を引き起こす。アユ等地域で親しまれる魚類への影響がしばしば大きく問題として取り上げられており、こうした河川環境への影響を防ぐため、除去などの対応が求められている（内田, 1997）。

近年、付着藻類の除去を目的とした研究がなされており、流量・流速の変化のみでは生育した付着藻類は剝離しにくいことが報告されており（戸田ら, 2001）、流水のみで繁茂量の制御を行うことは難しいと考えられる。流水の場合よりも高い付着藻類の除去効果を得る手法として、流水に土砂を供給する研究例が多く報告されている。田代ら（2003）は掃流砂礫による付着藻類の

剝離効果と河床の擾乱作用との関係から、河床のアーマー化が進行した低擾乱状態にある河床における付着藻類に対する砂の投入が有効であることを指摘している。北村ら（2000）は砂礫移動による付着藻類の剝離特性について実験的に検討を行い、砂礫の衝突による総仕事量を用いて付着藻類の剝離量を推定した。

本研究では、水理実験により掃流土砂を用いた付着藻類の除去効果に関する検討を行う。掃流土砂を用いた剝離動態については、河床勾配や流量、流れ場の礫形状などによる水理諸条件に加えて、土砂粒径や土砂供給量などの掃流土砂に関する条件、また成長ステージや枯死など付着藻類に関する条件などが複雑に関係すると考えられる。本実験では土砂粒径および土砂供給量に注目して実験を行った。土砂粒径に関してはふるい分けにより既往の研究（赤松ら、2009）で報告されている剝離に最適な粒径の範囲を含む5種類の粒径条件を設定して剝離特性との関係を検討した。土砂供給量に関しては大きく2種類設定し、各粒径条件における変化を検討した。さらに、水理条件、土砂粒径、土砂供給量をパラメタとして含む仕事量を算出することで付着藻類の除去効果についても検討を行った。

II. 実験概要

1. 実験装置

図1に実験に用いた水路の概要を示す。水路は岩手大学農学部水理実験室内に設置し、水路の全長は8.6m、長方形断面水路（幅0.15m、高さ0.15m）であり、勾配を1/24とし、流下距離6.3～6.8m地点において付着藻類カワシオグサを設置する領域を設けた。できるだけ平らな面のものを使用したがる、若干の凹凸があること、また礫間の隙間に砂が溜まって流下の妨げになることを考慮して、礫間の隙間を油粘土で埋めて平らな河床とし、付着藻類の繁茂面も河床高さとなるように設置した。

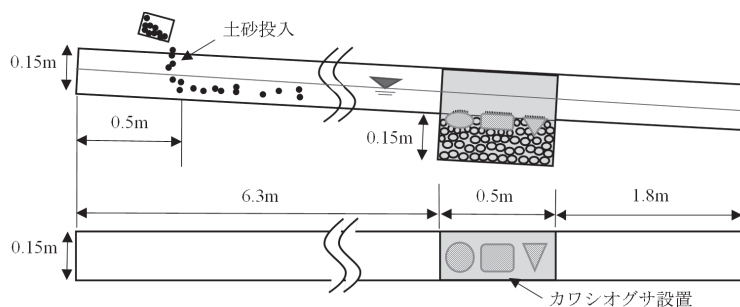


図1 実験装置図

2. 実験条件

本実験では掃流土砂の条件と付着藻類の剝離効果を把握するため、一定の水利条件の下で土砂の粒径と供給量を変化させた。実験開始時から5分毎にスケッチまたは撮影を繰り返し、付着藻類の剝離に変化がみられなくなるまで付着藻類の時間的変化を把握した。流量は $3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ であり、このときの等流水深は0.02m、フルード数は2.74である。表1に各実験における単位幅流砂量、土砂粒径を示す。付着藻類の繁茂している礫は岩手県盛岡市を流れる中津川の綱取ダム下流域および花巻市を流れる稗貫川の早池峰ダム下流域より採取した。赤松ら（2009）は水路実験から掃流砂による付着藻類の強制剝離には $5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ m}$ 程度の粒径の砂礫が効果的であることを示しており、本実験では

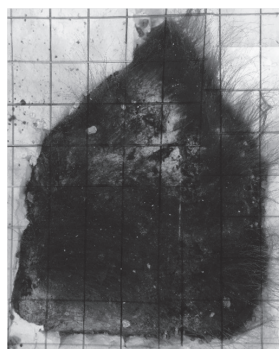
表1 実験条件

Exp.	単位幅流砂量 qB ($10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)	土砂粒径 d (m)	礫の採取地点
1	2.16	0.01	綱取ダム下流域 早池峰ダム下流域
2	2.19	0.0275	
3	2.17	0.015	
4	2.05	0.005	
5	2.09	0.002	
6	1.11	0.0275	
7	1.05	0.015	
8	1.06	0.01	
9	1.17	0.005	

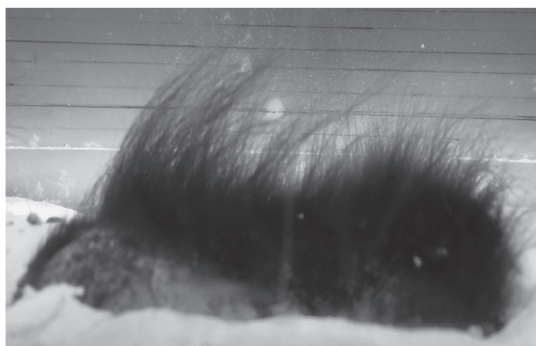
これらを含む土砂粒径の範囲とした。

3. 評価方法

各実験に設置した礫の個数は概ね4つ程度である。5分毎に真上、真横、斜め上からの視点からのスケッチまたは撮影を行い、付着藻類の時間的変化を記録した。付着藻類の剝離過程を観察したところ、剝離の特徴として礫に付着した基質部分からまとめて剝離する様子と共に、徐々に短くなり最終的に基質から剝離する様子が見られたことから、付着藻類の剝離動態の評価として以下の手順により付着藻類の存在体積に相当する量の変化によって剝離率を算出することとした。真上からの撮影時に $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ のマスをはいたアクリル板を設置し、 1 cm^2 の1マス内に見られる付着藻類の存在を10段階で数値化し、時間毎の付着藻類の面積を算出した。また、長さに関しては真横からの画像のみでは奥行き方向の長さの分布が把握できないため、真横および斜め上からの画像から総合的に長さの分布を判断した。ただし、画像の手前から中央部にかけての高さの測定はある程度可能であったが、奥側の長さの判断が困難であったため凡その測定となっている。(写真1参照)



(a) 真上から撮影



(b) 真横から撮影

写真1 付着藻類の分布状況 (Exp. 9, 開始5分後)

Ⅲ. 実験結果

1. 付着藻類の存在体積の時間変化

図2はExp. 6～9における付着藻類の存在体積の時間変化を初期値で基準化して示している。礫には上流側からA～Dと識別し、4データの平均値も示している。図より、存在体積が時間とともに指数関数的に減少することがわかる。そこで以下のように近似式を作成した。

$$V/V_0 = e^{-pt} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、初期状態での付着藻類存在体積を V_0 、時間 t における存在体積を V とする。図中の近似曲線は切片を1.0で固定しており、一部Exp. 8Aのように変化率が大きいと再現の難しい場合があるが、概ね(1)式により近似できていることがわかる。指数部の係数 p を剝離特性値として、その値が大きい程剝離速度が大きいことを示す。Exp. 6～9は同程度の流砂量の条件であり、土砂粒径が異なる実験である。Exp. 6からExp. 9に向かって粒径は小さくなり、

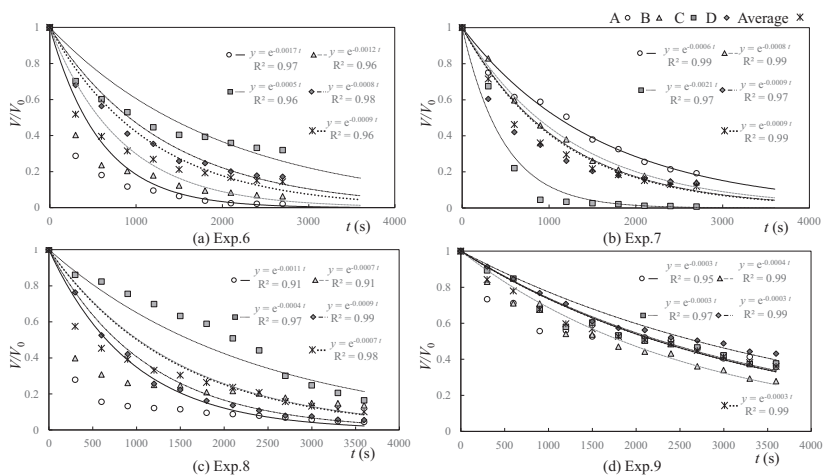


図2 付着藻類の存在体積の時間変化

これより粒径が小さい場合には剝離過程がゆっくり進行することがわかる。また、図中には平均値によるフィッティングも示しているが、各礫での結果には大きなばらつきがあり、平均値から大きく剝離しているケースも見受けられ、安定的な傾向把握が難しいことがわかる。これは礫が完全な平面ではなくそれぞれに凹凸があることが大きく関係していると考えられる。

2. 土砂粒径 d と剝離特性値 p の関係

図3は土砂粒径 d と剝離特性値 p の関係を示している。粒径0.015m以下の範囲では土砂粒径 d と剝離特性値 p の間に高い正の相関性が確認できる。一方で、粒径0.015mと0.0275mでは p 値の分布に差異がみられず、単位幅流砂量を変化させても同様の傾向を示した。これより、剝離特性値 p は粒径0.015m以下の範囲では土砂粒径 d と良好な相関関係で示すものの、それ以上の粒径では単純な相関関係として表せないことを示している。これは土砂と付着藻類との接触機会、すなわち大きい粒径の土砂は小さい粒径よりも摩擦が大きい反面、接触の機会が少なくなることが関係していると考えられる。剝離特性値 p は土砂粒径に伴う摩擦力および土砂と付着藻類との接触頻度のバランスによって決定されるものと考えられる。また、土砂粒径が大きくなる程 p 値の分布にばらつきが見られる。土砂粒径が大きくなる程土砂形状の影響を受けやすいこと、礫の持つ僅かな凹凸により受ける影響が粒径によって異なることなどが考

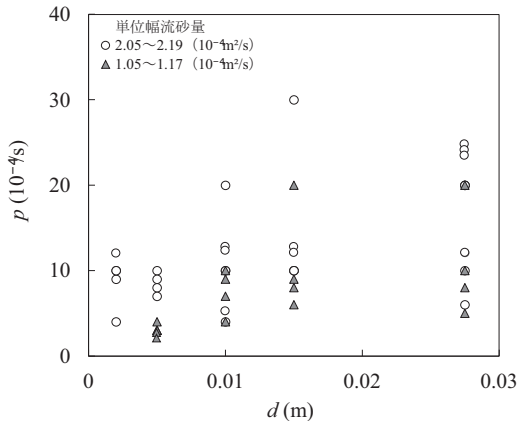


図3 土砂粒径 d と剝離特性値 p の関係

えられる。

3. 単位幅流砂量 q_B と剝離特性値 p の関係

図4は単位幅流砂量 q_B と剝離特性値 p の関係を示している。単位幅流砂量 q_B の増大により剝離特性値 p も増大する傾向がみられる。土砂供給量の増加に伴い付着藻類が存在する空間を土砂が通過する確率が高まるためと考えられる。図中の回帰直線は切片を0として求めており、土砂粒径が大きくなることでその傾きが大きくなっているが、Ⅲ2節で示したように粒径0.015mで最大となっている。また、その分布には大きなばらつきがある。実験時には小さい粒径の土砂は水路幅全体を這うように流下するのに対して粒径が大きくなるとより不規則な土砂の流下が観察されており、単位幅流砂量 q_B のみで整理することは難しいと考えられる。また設定した単位幅流砂量は2通りであるため十分な検討ができておらず、その相関性に関してはさらなる追加実験が必要である。また、今回の実験では土砂が礫の上に堆積しない程度での流砂量設定での検討であり、堆砂した状態での剝離動態はまた大きく傾向が異なることが予測されるため、さらなる実験検討が必要である。

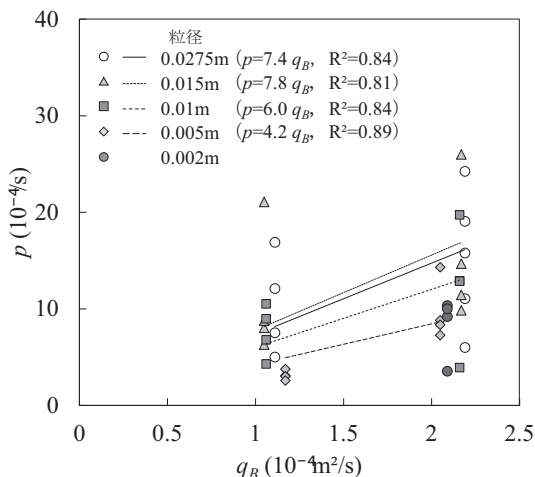


図4 単位幅流砂量 q_B と剝離特性値 p の関係

4. 仕事量 W_x と剝離特性値 p の関係

ここまでの実験結果から、剝離特性値 p は土砂粒径 d および土砂供給量 q_B 、両者の影響を受けることが示されたため、両者をパラメタに含む仕事量を用いて剝離特性値 p の検討を行う。田代ら（2003）は弾性衝突理論に基づく石橋（1983）の解析結果を基に、サルテーション砂礫のなす摩擦力による仕事量 W_x を以下の式で検討している。

$$W_x = \gamma q_B d^{1/3} u_*^{2/3} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 u_* は摩擦速度であり、 γ は係数で礫では 2.02×10^5 ($\text{Nm}^{-4} \text{s}^{2/3}$) 程度である。サルテーション運動とは砂礫が河床上を転がる運動機構であり、実験観察の様子からも付着藻類の剝離要因は、付着藻類の基質部分へのサルテーション運動する砂礫の衝突にあると考えられる。本実験においても（2）式を用いることで、土砂粒径 d および単位幅流砂量 q_B をパラメタとした仕事量 W_x による剝離特性値 p の検討を行う。図5は、仕事量 W_x と剝離特性値 p の関係を示している。ただし、剝離特性値 p の分布にばらつきが大きい粒径 0.0275m の場合における結果は除いている。○は各実験、各礫における結果をすべて示し、●は実験毎の平均値を示している。また、回帰直線の切片を0に固定している。図より仕事量と剝離特性値 p の間には線型的な関係が認められ、その傾きを a とおくと以下の式での近似が可能となる。

$$p = a W_x = a \gamma q_B d^{1/3} u_*^{2/3} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 a は付着藻類の成長状態に依存する係数に相当し、本実験で用いられた付着藻類の状態では 7.28×10^{-4} ($\text{N}^{-1} \text{m}$) 程度が適当である。同図より水理条件、土砂粒径 d および単位幅流砂量 q_B をパラメタとして含む仕事量 W_x を用いることで付着藻類の剝離特性を統一的に検討することが可能となる。ただし、各実験における礫毎の結果にはばらつきが大きく、礫形状による影響を考慮する必要があると考えられる。

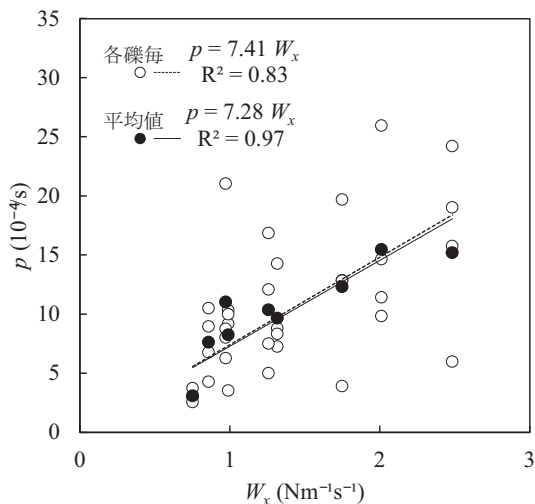


図5 仕事量 W_x と剥離特性値 p の関係

IV. まとめ

投入砂礫による付着藻類の剥離動態の定量評価を目的に水理実験による検討を行った。土砂粒径 d および単位幅流砂量 q_B について剥離特性値 p との関係を検討した結果、各パラメタが剥離特性値 p に影響を及ぼすこと、また相関性を示す範囲があることを示した。また、水理条件、土砂粒径 d および単位幅流砂量 q_B をパラメタとする仕事量 W_x を算出することにより、付着藻類の平均的な剥離効果を算出できることを示した。礫の形状による抵抗係数の検討、また付着藻類の成長段階による剥離特性の変化の検討など、現場への適用における課題も多く、さらなる検討が必要である。

引用文献

- 赤松良久，池田駿介，浅野誠一郎，大澤和敏：ダム下流における糸状藻類の強制剥離に関する研究，土木学会論文集 B，65，No. 4，285-295（2009）
- 石橋 毅：ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学研究，土木学会論文報告集，334，103-112（1983）

- 内田朝子：矢作川における付着藻類と底生動物の基礎調査報告，矢作川研究，No. 1，59-80（1997）
- 北村忠紀，加藤万貴，田代 喬，辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剝離除去に関する実験的研究，河川技術に関する論文集，6，125-130（2000）
- 田代 喬，渡邊慎多郎，辻本哲郎：掃流砂礫による付着藻類の剝離効果算定に基づいた河床攪乱作用の評価について，水工学論文集，47，1063-1068（2003）
- 戸田祐嗣，赤松良久，池田駿介：平坦河床上の藻類の増殖と剝離に関する研究，水工学論文集，45，1111-1116（2001）

（原稿受付2020年 7 月10日，原稿受理2020年 8 月24日）